

REPUBLIQUE TUNISIENNE

MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DES RESSOURCES HYDRAULIQUES

DIRECTION GENERALE DU GENIE RURAL
ET DE L'EXPLOITATION DES EAUX

MESURES D'ACCOMPAGNEMENT ET DE FORMATION



UTILISATION DES EAUX
SAUMATRES EN IRRIGATION

RAPPORT DE MISSION

DU 4 AU 11 MARS 2005

par Serge MARLET
CIRAD / Montpellier

1. Tâches et objectifs

Dans le cadre de son intervention au projet PISEAU, IGIP a chargé Mr Serge MARLET du CIRAD à Montpellier, expert en utilisation des eaux salées en irrigation, de préparer un programme de formation de 2 jours auprès d'une assemblée de responsables tunisiens des centres régionaux de développement agricole (CRDA) : arrondissements périmètres irrigués et ressources en sols. Le programme de formation a tout d'abord été conçu sur la base d'un travail bibliographique préparatoire réalisé au CIRAD à Montpellier, puis enrichi et adapté suite à l'examen de la situation actuelle dans différents périmètres irrigués de Tunisie. L'objectif proposé était de faire connaître :

- Les impacts négatifs de la salinisation et des conditions qui engendrent la salinisation (qualité des eaux, des sols, pratiques culturales, ...) ;
- Les critères d'évaluation qui traduisent les risques réels de salinisation et d'alcalisation des sols ; et
- Les mesures de correction des sols ou favorisant l'atténuation de la salinité des périmètres irrigués.

La mission se déroulait dans le cadre d'une série d'ateliers sur un financement de la KfW et sous tutelle de la Direction Générale du Génie Rural et de l'Exploitation des Eaux (DG/GREE au Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques).

2. Déroulement de la mission

La mission s'est déroulée du 2 au 8 mars 2005 pour ce qui concerne les objectifs spécifiques de la formation. Le séjour s'est poursuivi sous la forme d'une visite complémentaire de l'oasis de Fatnassa les 9 et 10 mars dans le cadre de la préparation du projet SIRMA (FSP Economie de l'eau dans les systèmes irrigués au Maghreb). La mission s'est enfin conclue le 11 mars sous forme d'une réunion finale avec la DG/GREE, commanditaire de la formation.

Programme détaillé de la mission :

Date (Mars 2005)	Activités	Personnes rencontrées
Mercredi 2	Départ de Montpellier - Arrivée à Tunis	
	Réunion préparatoire aux visites de terrain et à la formation	M. Hamdane, Mme El Atiri (DG/GREE), M Hechler (IGIP)
Jeudi 3	Réunion au CRDA d'Ariana Visite du périmètre de Kalaat Landelous	M. Kais, M. Brari, Mme Ben Amor, M. Jradi (CRDA Ariana)
	Visite à la direction des sols	M. Hamrouni (DS), en présence de M. Bouksila (INRGREF)
Vendredi 4	Province de Mahdia : Visite d'exploitations irriguées de Bir Ben Kemla (essai irrigation) et du périmètre d'Hiboun	M. Saïda, M. Abdessalem, M. Bachamba (CRDA Mahdia)
Samedi 5	Réunion au CRDA de Kairouan Visite d'exploitations irriguées dans la périphérie de Kairouan	M. Messaoud, M. Khelif, M. Hajjij, M. Ben Ayed (CRDA Kairouan)
Dimanche 6	Préparation du séminaire de formation	
Lundi 7	Première journée du séminaire de formation	Mme El Atiri, M. Ben Ayed, Mme Gharbi (DG/GREE) et les participants au séminaire (CRDAs)
Mardi 8	Seconde journée du séminaire de formation	Mme Gharbi (DG/GREE) et les participants au séminaire (CRDA)
	Visite à l'INRGREF	M. Hachicha (INRGREF)
Mercredi 9 et jeudi 10	Visite de l'oasis de Fatnassa-Nord (CRDA Kébili)	M. Bouksila et Mme Mekki

Vendredi 11	Réunion finale	M. Hamdane, Mme El Atiri, M. Ben Ayed, Mme Gharbi (DG/GREE), M. Hechler (IGIP)
	Départ de Tunis – Retour à Montpellier	

3. Examen de quelques situations d'agriculture irriguée avec des eaux salées en Tunisie

Trois gouvernorats ont été visités dans le cadre de la préparation du séminaire de formation : CDRA Ariana (visite du périmètre de Kalaat Landelous), CRDA de Mahdia (secteur de Bir Ben Kamla et périmètre de Hiboun) et CRDA de Kairouan (exploitations irriguées en périphérie de Kairouan).

Le périmètre de Kalaat El Andelous est situé sur des sédiments marins récents dans la basse vallée de la Medjerda. La nappe est très proche de la surface et salée, ce qui a conduit à la mise en place d'un réseau de drains enterrés et de collecteurs lors de la conception de l'aménagement. Des contraintes liées à la salinité des sols se sont manifestées dès la mise en exploitation du périmètre du fait de la présence initiale de sels dans les sols. D'après les informations recueillies, il semble que la situation se soit sensiblement améliorée en raison d'un lessivage efficace des sols sous l'influence de l'irrigation, des pluies hivernales et du drainage. Des procédures ont été mises en œuvre pour interrompre les irrigations dès que les eaux deviennent trop salées (seuil de 3 g/l) et les reprendre suite au lâchage d'eaux plus douces issues des réservoirs situés en amont. Les problèmes liés à la salinité ne semblent subsister que localement et lors des années à pluviométrie très déficitaire. Lors de la visite, il ne s'est trouvé personne pour considérer que la salinité était un problème préoccupant sur le périmètre.

Les pratiques de certains irrigants semblent par ailleurs conduire à une consommation en eau trop élevée, en particulier pour les cultures estivales sous irrigation localisée. Ce comportement des agriculteurs pourrait résulter d'une adaptation de leurs pratiques à la salinité en privilégiant une fréquence et des doses d'irrigation élevées pour éviter toute augmentation préjudiciable de la salinité dans la zone racinaire. Les volumes pompés à l'exutoire du système de drainage sont élevés et contribuent à l'évacuation d'une quantité de sels (principalement issus de la nappe) supérieure à celle apportée par l'irrigation. L'objectif prioritaire semble davantage lié à une gestion plus économe de la ressource en eau (et la réduction des coûts de pompage pour les eaux d'irrigation et de drainage) qu'à des mesures spécifiquement liées à la salinité. Cependant, une éventuelle réduction des consommations en eau pourrait conduire à une accentuation des facteurs de risque liés à la salinité, et des investigations complémentaires pour la gestion et le contrôle de la salinité pourraient dès lors devenir nécessaires.

Les provinces de Mahdia et de Kairouan sont caractérisées par une pluviométrie moins favorable, et l'agriculture y est souvent tributaire de l'exploitation d'eaux souterraines de mauvaise qualité pour l'irrigation.

Dans la première situation visitée (proximité de Bir Ben Kamla, CRDA de Mahdia), des essais de conduite de l'irrigation localisée sur sols sableux avec des eaux salées (5 à 6 g/l) issues d'une nappe peu profonde ont été conduits avec succès dans le cadre d'un programme ArabSalt mené par le CRDA en collaboration avec l'INRGREF, coordonné par l'ACSAD et financé par le FIDA. Les baisses de rendements sont insignifiantes. Le niveau de salinité des sols revient à son niveau initial après la saison hivernale pluvieuse, même si la salinité peut atteindre des niveaux élevés en surface à l'issue de la période de culture estivale. Les principales inquiétudes apparaissent liées à la durabilité de ce mode d'exploitation de la nappe dont la salinité pourrait s'accroître rapidement sous l'influence d'une augmentation incontrôlée des superficies irriguées.

Dans une seconde situation visitée (périmètre de Hiboun, CRDA de Mahdia), les agriculteurs irriguent avec une eau modérément salée (environ 3 g/l) issue d'une nappe profonde. La stratégie des agriculteurs apparaît fondée sur la pratique de cultures maraîchères sous tunnel plastique. Ces tunnels sont déplacés périodiquement pour s'affranchir des contraintes liées à l'augmentation de la salinité en l'absence de tout lessivage sous l'effet des pluies hivernales. Les superficies résiduelles sont cultivées à base de céréales et de fourrages en condition pluviale, et complémentirement irriguées en fonction du régime pluviométrique de l'année. Nous n'avons pas pu observer de manifestations de la salinité qui ne semble s'exprimer que lors des années à fort déficit pluviométrique. Certains exploitants semblent confrontés à une baisse de la fertilité des sols dont les causes restent à déterminer ; l'un d'entre eux aurait même abandonné temporairement sa parcelle.

Dans une troisième situation visitée (proximité de Kairouan, CRDA de Kairouan), les agriculteurs irriguent sur des superficies importantes à partir des eaux de la nappe. Sur la principale exploitation visitée d'une superficie d'environ 100 hectares, l'exploitant irrigue environ 30 hectares de grandes cultures (céréales et fourrages) sous aspersion pendant la saison pluvieuse et hivernale, et environ 12 hectares de cultures maraîchères en irrigation localisée pendant la saison estivale. Les puits originels semblent avoir été le plus souvent surcreusés en raison de la baisse du niveau de la nappe, mais aussi pour atteindre des eaux plus profondes et moins salées. Le contexte général d'exploitation et d'évolution de la qualité des eaux de nappe apparaît préoccupant ; la plupart des nappes ont été fortement rabattues tandis que leur salinité s'accroît. Un suivi de la salinité a été entrepris dans le cadre du projet PISEAU. Faute de moyens, il ne porte que sur 3 périmètres alors que 28 périmètres présentent des facteurs de risque de salinisation.

Dans ces différents contextes, il semble que l'on ne dispose que de peu d'informations sur les pratiques des agriculteurs et leurs performances technico-économiques en relation avec la salinité des eaux et des sols. Parmi les différentes questions soulevées, la durabilité du mode actuel d'exploitation des eaux de nappe superficielle est la plus préoccupante. Enfin, une analyse approfondie visant à l'adaptation des dispositifs de suivi en fonction des objectifs poursuivis et moyens disponibles apparaît nécessaire.

4. Observations sur le séminaire de formation

La session de formation a été organisée selon deux séquences consacrées aux bases d'évaluation des risques et impacts liés à la salinité, d'une part, et aux méthodes d'approche pour la gestion et le contrôle de la salinité, d'autre part.

La première séquence a été subdivisée en 6 parties consacrées à :

- (1) Evolution de la salinité des sols sous l'influence de l'irrigation ;
- (2) Sensibilité des cultures à la salinité ;
- (3) Aperçu sur les mécanismes associés aux impacts de la salinité ;
- (4) Influence des modes de conduite de l'irrigation ;
- (5) Quelques éléments de base sur la sodicité et l'alcalinité ; et
- (6) Evaluation de la qualité des eaux pour l'irrigation.

La seconde séquence a été subdivisée en 5 parties :

- (1) Présentation des acteurs de la gestion de la salinité ;
- (2) Démarche proposée ;
- (3) Analyse et amélioration des pratiques des agriculteurs ;
- (4) Conception et mise en œuvre de dispositifs d'observation ; et
- (5) ... en guise de conclusion.

Un large extrait des supports utilisés est présenté en annexe de ce compte-rendu.

Les attentes exprimées par la plus grande partie des participants concernent l'élaboration de normes et recommandations pour l'utilisation des eaux salées dans le cadre de leurs activités de conseil auprès des agriculteurs. Ces questions ont fait l'objet d'un débat contradictoire dans la mesure où la complexité et la diversité des situations rencontrées s'opposent à l'opérationnalité de normes élaborées indépendamment du contexte considéré. La formation se sera davantage attachée à fournir aux participants les moyens leur permettant de raisonner les situations auxquelles ils sont confrontés. Il reste cependant nécessaire de leur transmettre un certain nombre d'informations écrites et accessibles pour accompagner leur propre démarche d'analyse et de conseil, et cohérentes avec les directives transmises par les administrations de tutelle.

La formation aura insisté sur l'adoption de méthodes d'approche pour la gestion et le contrôle de la salinité. Deux démarches ont été privilégiées :

- La première repose sur un effort de compréhension de la stratégie et des pratiques des agriculteurs. Ce n'est qu'à partir d'une vision partagée de la situation, et avec la participation des agriculteurs, que des améliorations durables pourront être obtenues. Cela permettrait de concevoir et mettre en œuvre des actions adaptées au contexte pour accompagner les changements de pratiques chez les agriculteurs. Les mentalités et pratiques des professionnels restent très marquées par une démarche « *top-down* » de vulgarisation des innovations.
- La seconde concerne l'adaptation des dispositifs de suivi sur la base d'un raisonnement en fonction de : l'élaboration d'hypothèses argumentées sur les risques et le fonctionnement du milieu ; l'intégration des activités de suivi aux différents aspects de la gestion des périmètres irrigués ; et les moyens disponibles. Les dispositifs proposés et mis en œuvre restent souvent trop normatifs pour répondre efficacement aux différents enjeux identifiés localement.

5. Conclusions et perspectives

La formation aura contribué à améliorer la perception des participants. Les résultats obtenus restent vraisemblablement limités pour deux raisons essentielles :

- Aucun document approprié n'aura été préparé et transmis. Il est à craindre que les acquis ne puissent être appliqués concrètement sur le terrain, ni être maintenus sur la durée.
- Aucun exemple local n'a pu être traité en profondeur faute de travaux correspondants disponibles. Comme tout investissement dans le domaine de la formation, son efficacité serait accrue par la mise en pratique sous forme d'exemples d'application adaptés aux contextes.

En conséquence, nous tenons à attirer l'attention sur l'intérêt qu'il y aurait à poursuivre l'effort engagé selon un processus intégrant :

- La rédaction préalable d'un manuel (ou guide) fournissant à la fois les informations nécessaires et des recommandations quant à leur application. Ce travail pourrait être réalisé sur la base du contenu de cette formation, et adapté grâce à l'expérience et à la participation de quelques experts tunisiens ;
- Réalisation d'un travail d'accompagnement pour la mise en œuvre concrète de ces recommandations, appliquées à quelques situations représentatives de l'irrigation avec des eaux salées en Tunisie. Ce cadre opérationnel apparaît nécessaire pour préciser et adapter les recommandations générales aux différents contextes, y compris en fonction des moyens et compétences disponibles localement ;
- Cette phase pourrait aussi être accompagnée par une activité de formation continue à chacune des étapes de la démarche, et sur la base des résultats obtenus ;
- Rédaction d'un rapport final et réactualisation du manuel (ou guide) sur la base des réalisations, et de l'expérience acquise.

Utilisation des eaux salées en agriculture

Quelques éléments introductifs
sur la Tunisie

1

Ressources en eau

- Des ressources en eau inégalement réparties (Ministère de l'Agriculture, 1998) :

Water resources	North		Centre		South		Total	
	Mm ³	%	Mm ³	%	Mm ³	%	Mm ³	%
Surface water	2190	78	320	38	190	19	2700	58
Shallow aquifers	395	14	222	26	102	10	719	15
Deep aquifers	216	8	306	36	728	71	1250	27
Total	2801	100	848	100	1020	100	4669	100
%	60		18		22		100	

- Utilisation d'environ 2600 Mm³ (57%), principalement pour l'irrigation d'environ 370 000 ha
- Mobilisation de volumes équivalents aux eaux de surface (!)

2

Qualité des eaux et salinisation

- Eau de surface de qualité variable – 72% < 1.5 g/l, mais seulement 20% et 8% pour les nappes profondes et superficielles (50% du total environ).
- Globalement, une quantité d'eau équivalente aux eaux non salées disponibles est d'ores et déjà exploitée (!)
- 200000 hectares seraient affectés à des degrés divers par la salinité (Mashali, 1995), soit plus de 50% (!).
- Importance et intensité variable en fonction de la pluviométrie, de la profondeur de la nappe (+ drainage), de la qualité des eaux, ...

3

Utilisation des eaux salées

- De nombreuses situations sont confrontées à une ressource en une eau salée ... Et différentes stratégies adaptatives de la part des agriculteurs (pompage profonds, assolement, ...)
- Des normes arrêtées par l'état pour l'attribution de subvention (principe de précaution) : Utilisation des eaux salées favorisées jusqu'à 4 g/l, étendue jusqu'à 5 g/l sous réserve d'expertise pédologique (sol drainant)
- Des attentes exprimées pour l'établissement de normes d'utilisation des eaux salées plus élaborés et adaptés à chaque contexte ... Notamment pour le conseil auprès des agriculteurs d'innovations et d'amélioration des pratiques et performances

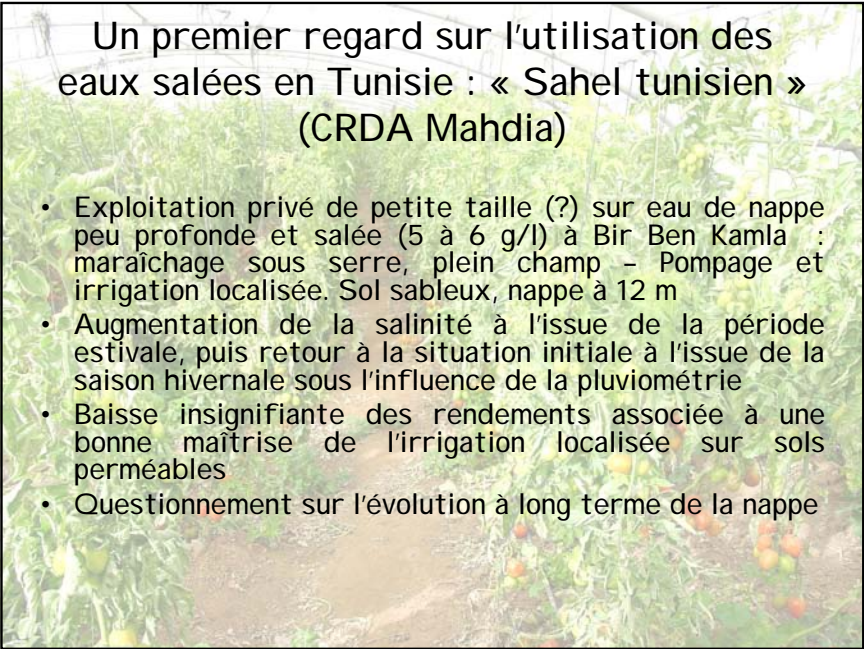
4

Un premier regard sur l'utilisation des eaux salées en Tunisie : Nord de la Tunisie (CRDA Ariana)

- Visite du périmètre de Kalaat Landelous
- Facteurs de risque liés à la qualité parfois moyenne (jusqu'à 3g/l) de l'eau d'irrigation, et surtout la présence d'une nappe sub-affleurante et très salée
- Saison hivernale (vivrier, fourrage et maraîchage : artichaut, ...) ; Saison estivale (maraîchage : tomate, ...)
- Des débuts difficiles, mais pluviométrie favorable et réseau de drainage enterré conduisent aujourd'hui à améliorer le lessivage et réduire les contraintes liées à la salinité
- Problème de surconsommation en eau d'irrigation, et fort volume d'eau drainée (et pompée)
- Bilan en sel déficitaire à l'échelle de l'aménagement (sorties>entrées)

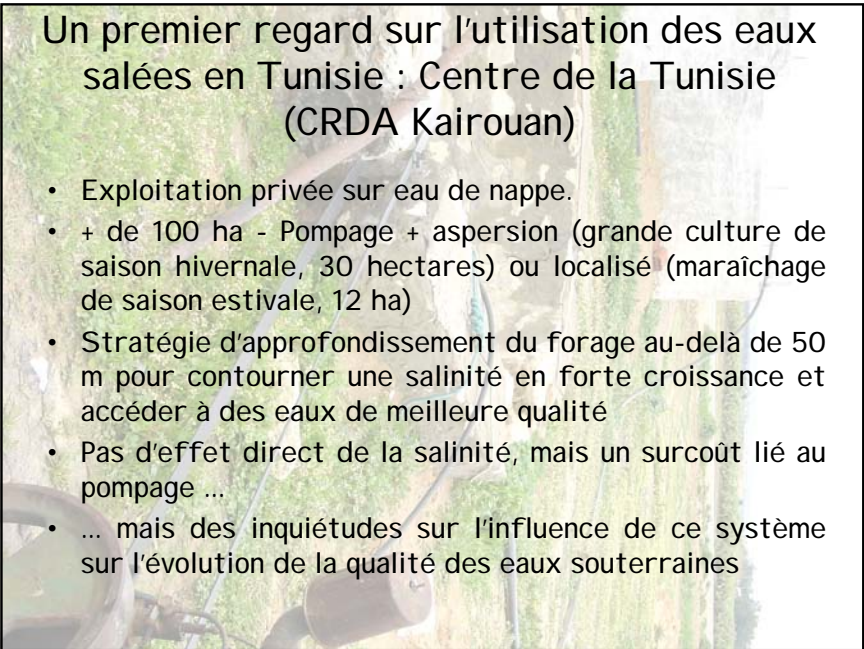
Un premier regard sur l'utilisation des eaux salées en Tunisie : « Sahel tunisien » (CRDA Mahdia)

- Visite du périmètre d'Hiboun : aménagement collectif sur forage profond (environ 3 g/l) : maraîchage sous serre, vivrier, ... - distribution gravitaire.
-
- Stratégie fondée sur une rotation des cultures sous serre permettant un dessalement des sols sous l'influence de la pluviométrie hivernale
- Influence déterminante des variations interannuelles de la pluviométrie dans la manifestation de la salinité



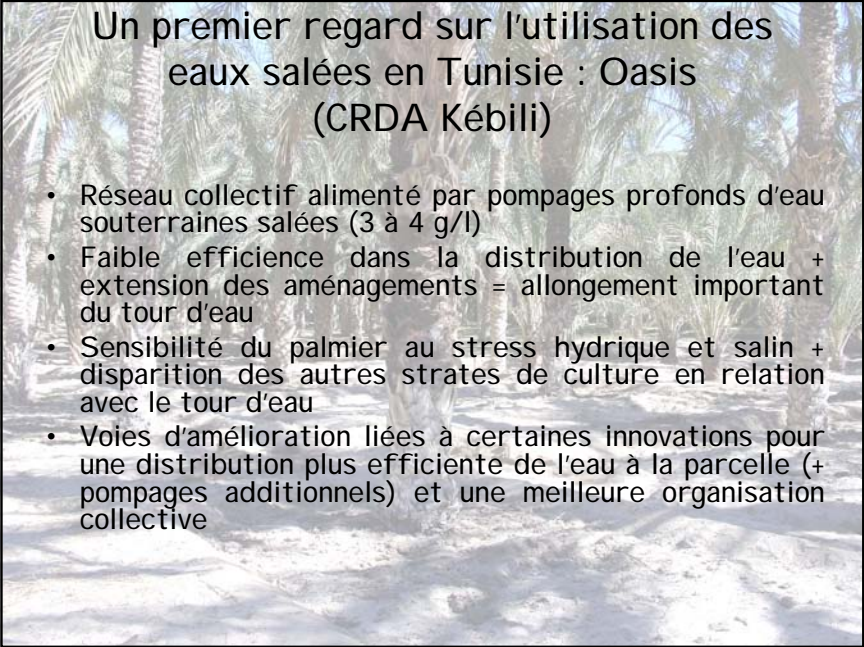
Un premier regard sur l'utilisation des eaux salées en Tunisie : « Sahel tunisien » (CRDA Mahdia)

- Exploitation privée de petite taille (?) sur eau de nappe peu profonde et salée (5 à 6 g/l) à Bir Ben Kmla : maraîchage sous serre, plein champ – Pompage et irrigation localisée. Sol sableux, nappe à 12 m
- Augmentation de la salinité à l'issue de la période estivale, puis retour à la situation initiale à l'issue de la saison hivernale sous l'influence de la pluviométrie
- Baisse insignifiante des rendements associée à une bonne maîtrise de l'irrigation localisée sur sols perméables
- Questionnement sur l'évolution à long terme de la nappe



Un premier regard sur l'utilisation des eaux salées en Tunisie : Centre de la Tunisie (CRDA Kairouan)

- Exploitation privée sur eau de nappe.
- + de 100 ha - Pompage + aspersion (grande culture de saison hivernale, 30 hectares) ou localisé (maraîchage de saison estivale, 12 ha)
- Stratégie d'approfondissement du forage au-delà de 50 m pour contourner une salinité en forte croissance et accéder à des eaux de meilleure qualité
- Pas d'effet direct de la salinité, mais un surcoût lié au pompage ...
- ... mais des inquiétudes sur l'influence de ce système sur l'évolution de la qualité des eaux souterraines



Un premier regard sur l'utilisation des eaux salées en Tunisie : Oasis (CRDA Kébili)

- Réseau collectif alimenté par pompages profonds d'eau souterraines salées (3 à 4 g/l)
- Faible efficacité dans la distribution de l'eau + extension des aménagements = allongement important du tour d'eau
- Sensibilité du palmier au stress hydrique et salin + disparition des autres strates de culture en relation avec le tour d'eau
- Voies d'amélioration liées à certaines innovations pour une distribution plus efficace de l'eau à la parcelle (+ pompages additionnels) et une meilleure organisation collective

Premiers enseignements

- Peu de manifestations visuelles de la salinité, ni d'effets appréciables sur les rendements dans les situations observées
- Une certaine dépendance à la pluviométrie
- Un rôle positif de la maîtrise individuelle de l'irrigation dans les réseaux « à la demande »
- ... Mais de plus grandes difficultés dans les réseaux collectifs « au tour d'eau » ou localement en raison d'un drainage insuffisant
- Des contraintes et surcoûts liés à la salinité qui restent à évaluer : investissement de drainage, forage plus profond et coût du m³ pompé, « surconsommation apparente », ...
- Un enjeu primordial lié à l'évolution de la qualité des eaux souterraines peu profondes utilisées localement (centre) pour l'irrigation

A. Bases d'évaluation des risques et impacts liés à la salinité

1. Évolution de la salinité des sols sous l'influence de l'irrigation

11

Notion de fraction de lessivage (1)

- Avec l'apport d'eau salée, la salinité du sol s'accroît pour tendre vers un équilibre en fonction des quantités d'eau excédentaires assurant un lessivage des sels au-delà de la zone racinaire (ou vers un système de drainage)
- A l'échelle de l'année (ou de la saison culturale), l'excédent d'eau d'irrigation et le volume d'eau percolé ou drainé (D) peut être estimé en fonction des différents termes du bilan hydrique (Pluie P, Irrigation I et Evapotranspiration ET), tel que :

$$P + I - ET - D = 0$$

12

Notion de fraction de lessivage (2)

- La quantité de sels résulte d'un équilibre entre les quantité de sel apportée par les eaux d'irrigation (concentration C_i), et la quantité de sels lessivée ou drainée (concentration assimilée à celle de la solution du sol, C_s) au-delà de la zone racinaire
- A l'échelle de l'horizon racinaire et à long terme, il apparaît ainsi possible de relier les quantités et qualités d'eau d'irrigation et de drainage, tel que :

$$C_s = C_i \frac{I}{D}, \text{ ou : } FL = \frac{D}{I} \text{ et } FC = \frac{1}{FL} = \frac{C_s}{C_i}$$

- FC est le Facteur de concentration et FL la Fraction de lessivage - FL)

13

Notion de fraction de lessivage (3)

- La capacité d'apport d'une quantité d'eau excédentaire par rapport aux besoins des cultures peut résulter de différentes facteurs :
- Conception des aménagements et disponibilité en eau suffisante
- Savoir-faire de l'agriculteur : contrôle de la dose et uniformité de la distribution
- Présence d'une nappe sub-affleurante et existence d'un système de drainage
- Type de sol et fractions de lessivage maximale. Par ex :

Texture	Sand	Loam	Clay
FL%	60	33	20
FC (-)	1.7	3	5

14

Indicateurs de la salinité

- La salinité est souvent évalué à partir d'un extrait de pâte saturée (C_e). Il correspond à un apport d'eau supérieur à la teneur en eau dans les sols (à la capacité au champ par exemple). Cet effet de la dilution peut être corrigé en fonction de la texture et la densité apparente du sol
- En terme de bilan, les concentrations (C_s , C_e , C_i) sont exprimé en g/l ou eq/l (ou moles/litre pour chaque élément pris indépendamment)
- La salinité est plus facilement accessible par le mesure directe de la Conductivité Électrique (CE_s , CE_e , CE_i généralement exprimé en dS/m ou mmoh/cm).
- La mesure est fonction du nombre de charges (valence des anions ou cations), et pour un faciès chimique donnée (proportion respective des différents ions en solution), il existe une relation linéaire entre C et CE.

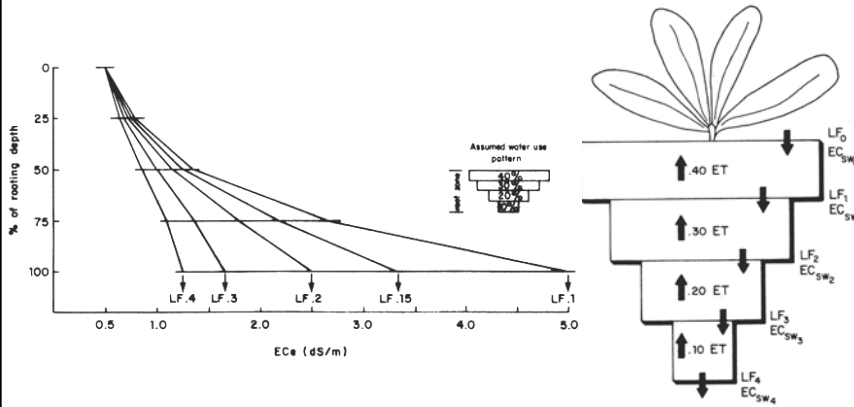
15

Premières notions sur la redistribution des sels dans le profil de sol

- Sous l'effet du lessivage, la concentration résultante n'est pas homogène sous l'effet de prélèvements d'eau et de flux de percolation différenciés avec la profondeur (cf. exemple 1)
- Suite à une période d'évaporation des flux d'eau ascendants favorisent une accumulation de sels en surface.
- La présence d'une nappe peu profonde réduit l'efficacité du lessivage et favorise les « remontées capillaires » d'eau et de sels (en l'absence de drainage) (cf. exemple 2)
- La nature des sols est susceptible de limiter le lessivage (perméabilité) ou de favoriser les remontées capillaires (cf. exemple 2)

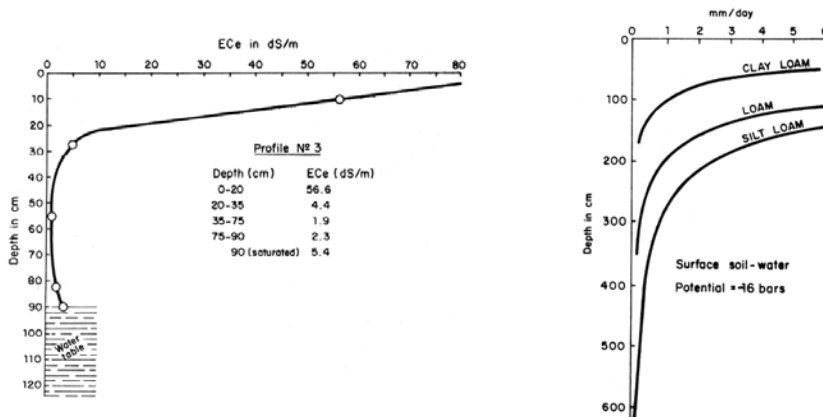
16

Exemple 1 : Influence de la fraction de lessivage (10 à 40%) : différenciation de 4 horizons, $CE_i=1\text{ds/m}$ et $CE_e/CE_s\approx 0.5$



Source : FAO, Bulletin d'irrigation et drainage 29 rev. 1 (Ayers et Westcot, 1994) 17
<http://www.fao.org/DOCREP/003/T0234E/T0234E00.htm>

Exemple 2 : Influence de la nappe et de la nature des sols sur les flux de « remontées capillaires »



Source : FAO, Bulletin d'irrigation et drainage 29 rev. 1 (Ayers et Westcot, 1994) 18
<http://www.fao.org/DOCREP/003/T0234E/T0234E00.htm>

Limites des notions appliquées à la fraction de lessivage

- La salinité connaît de fortes variations temporelles en fonction du régime hydrique : lessivage rapide lors des irrigations (ou fortes pluies), apparition de salants blancs à l'issue des phases d'évaporation
- ... Mais aussi spatiale en fonction de l'uniformité des irrigations (et des propriétés des sols)
- L'objectif est en fait d'éviter l'apparition de conditions défavorables dans l'horizon racinaire pendant la phase de culture. La salinité de l'intersaison n'est pas un indicateur véritablement pertinent
- Les modes de conduite des irrigations et la répartition des sels dépendent des modes d'irrigation (gravitaire, localisé, aspersion) : cf. suite

19

A. Bases d'évaluation des risques et impacts liés à la salinité

2. Sensibilité des cultures à la salinité

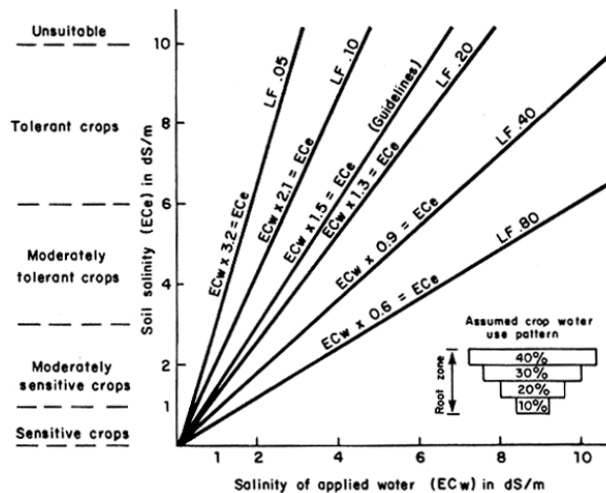
20

Premiers éléments d'appréciation de l'adaptation des pratiques et de la culture pour l'utilisation des eaux salées

- Trois critères interdépendants pour l'évaluation (cf. figures) :
- La qualité de l'eau d'irrigation (EC_w , g/l ou dS/m)
- La fraction de lessivage et le niveau résultant de salinité du sol, ou d'un extrait de pâte saturée (EC_e , g/l ou dS/m)
- La sensibilité ou tolérance variables des cultures vis-à-vis de la salinité (cf. suite)
- NB : Niveau standard de fraction de lessivage considéré d'environ 17% (Guidelines)

21

Effet de la salinité des eaux d'irrigation (EC_w) sur la salinité du sol (EC_e) pour différentes fractions de lessivage (LF)



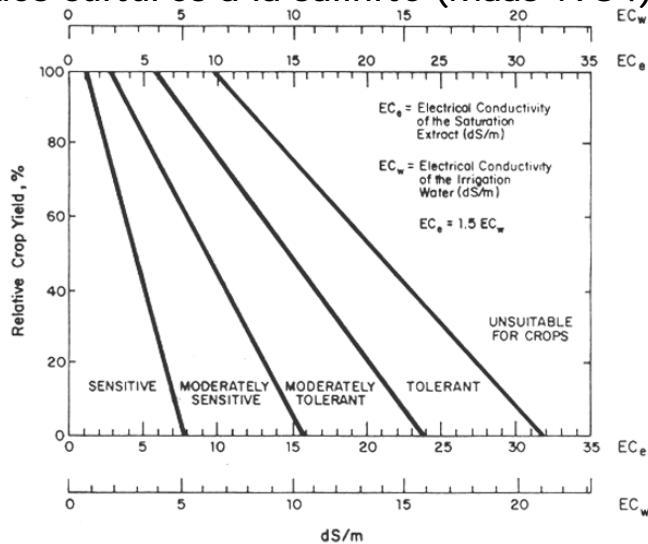
22

Principes d'évaluation de la sensibilité ou tolérance des cultures à la salinité

- classification réalisée à partir de la synthèse des observations réalisées = Base expérimentale de l'estimation de différentes grandeurs :
- Seuil maximal de salinité pour l'obtention du rendement potentiel
- Décroissance (supposée linéaire) du rendement (de 100% à 50% du rendement potentiel) en fonction de niveaux croissants de salinité
- Une extrapolation pour la détermination d'une valeur limite de salinité (rendement nul)
- Une base de données accessible : FAO, Bulletin d'irrigation et drainage 29 rev. 1 (Ayers et Westcot, 1994)
- <http://www.fao.org/DOCREP/003/T0234E/T0234E00.htm>

23

Grands domaines de tolérance ou sensibilité des cultures à la salinité (Maas 1984)



24

Tolérance des cultures vivrières à la salinité des eaux d'irrigation (EC_w) ou des sols (extrait, EC_e)

FIELD CROPS	100%		90%		75%		50%		0%	
									"maximum" ^{ns}	
	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w
Barley (<i>Hordeum vulgare</i>) ^d	8.0	5.3	10	6.7	13	8.7	18	12	28	19
Cotton (<i>Gossypium hirsutum</i>)	7.7	5.1	9.6	6.4	13	8.4	17	12	27	18
Sugarbeet (<i>Beta vulgaris</i>) ^h	7.0	4.7	8.7	5.8	11	7.5	15	10	24	16
Sorghum (<i>Sorghum bicolor</i>)	6.8	4.5	7.4	5.0	8.4	5.6	9.9	6.7	13	8.7
Wheat (<i>Triticum aestivum</i>) ^{d, h}	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.3	13	8.7	20	13
Wheat, durum (<i>Triticum turgidum</i>)	5.7	3.8	7.6	5.0	10	6.9	15	10	24	16
Soybean (<i>Glycine max</i>)	5.0	3.3	5.5	3.7	6.3	4.2	7.5	5.0	10	6.7
Cowpea (<i>Vigna unguiculata</i>)	4.9	3.3	5.7	3.8	7.0	4.7	9.1	6.0	13	8.8
Groundnut (Peanut) (<i>Arachis hypogaea</i>)	3.2	2.1	3.5	2.4	4.1	2.7	4.9	3.3	6.6	4.4
Rice (paddy) (<i>Oryza sativa</i>)	3.0	2.0	3.8	2.6	5.1	3.4	7.2	4.8	11	7.6
Sugarcane (<i>Saccharum officinarum</i>)	1.7	1.1	3.4	2.3	5.9	4.0	10	6.8	19	12
Corn (maize) (<i>Zea mays</i>)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Flax (<i>Linum usitatissimum</i>)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Broadbean (<i>Vicia faba</i>)	1.5	1.1	2.6	1.8	4.2	2.0	6.8	4.5	12	8.0
Bean (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.3	4.2

25

Tolérance des cultures maraîchères et fourragères à la salinité des eaux d'irrigation ou des sols (extrait)

VEGETABLE CROPS										
Squash, zucchini (courgette) (<i>Cucurbita pepo melopepo</i>)	4.7	3.1	5.8	3.8	7.4	4.9	10	6.7	15	10
Beet, red (<i>Beta vulgaris</i>) ^h	4.0	2.7	5.1	3.4	6.8	4.5	9.6	6.4	15	10
Squash, scallop (<i>Cucurbita pepo melopepo</i>)	3.2	2.1	3.8	2.6	4.8	3.2	6.3	4.2	9.4	6.3
Broccoli (<i>Brassica oleracea botrytis</i>)	2.8	1.9	3.9	2.6	5.5	3.7	8.2	5.5	14	9.1
Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	2.5	1.7	3.5	2.3	5.0	3.4	7.6	5.0	13	8.4
Cucumber (<i>Cucumis sativus</i>)	2.5	1.7	3.3	2.2	4.4	2.9	6.3	4.2	10	6.8
Spinach (<i>Spinacia oleracea</i>)	2.0	1.3	3.3	2.2	5.3	3.5	8.6	5.7	15	10
Celery (<i>Apium graveolens</i>)	1.8	1.2	3.4	2.3	5.8	3.9	9.9	6.6	18	12
Cabbage (<i>Brassica oleracea capitata</i>)	1.8	1.2	2.8	1.9	4.4	2.9	7.0	4.6	12	8.1
Potato (<i>Solanum tuberosum</i>)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Corn, sweet (maize) (<i>Zea mays</i>)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Sweet potato (<i>Ipomoea batatas</i>)	1.5	1.0	2.4	1.6	3.8	2.5	6.0	4.0	11	7.1
Pepper (<i>Capsicum annum</i>)	1.5	1.0	2.2	1.5	3.3	2.2	5.1	3.4	8.6	5.8
Lettuce (<i>Lactuca sativa</i>)	1.3	0.9	2.1	1.4	3.2	2.1	5.1	3.4	9.0	6.0
Radish (<i>Raphanus sativus</i>)	1.2	0.8	2.0	1.3	3.1	2.1	5.0	3.4	8.9	5.9
Onion (<i>Allium cepa</i>)	1.2	0.8	1.8	1.2	2.8	1.8	4.3	2.9	7.4	5.0
Carrot (<i>Daucus carota</i>)	1.0	0.7	1.7	1.1	2.8	1.9	4.6	3.0	8.1	5.4
Bean (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.3	4.2
Turnip (<i>Brassica rapa</i>)	0.9	0.6	2.0	1.3	3.7	2.5	6.5	4.3	12	8.0
Wheatgrass, tall (<i>Agropyron elongatum</i>)	7.5	5.0	9.9	6.6	13	9.0	19	13	31	21
Wheatgrass, fairway crested (<i>Agropyron cristatum</i>)	7.5	5.0	9.0	6.0	11	7.4	15	9.8	22	15
Bermuda grass (<i>Cynodon dactylon</i>) ^l	6.9	4.6	8.5	5.6	11	7.2	15	9.8	23	15

Tolérance des cultures maraîchères et fourragères à la salinité des eaux d'irrigation ou des sols (extrait) : suite

Bermuda grass (<i>Cynodon dactylon</i>) ¹²	6.9	4.6	8.5	5.6	11	7.2	15	9.8	23	15
Barley (forage) (<i>Hordeum vulgare</i>) ¹³	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.4	13	8.7	20	13
Ryegrass, perennial (<i>Lolium perenne</i>)	5.6	3.7	6.9	4.6	8.9	5.9	12	8.1	19	13
Trefoil, narrowleaf birdsfoot (<i>Lotus corniculatus tenuifolium</i>)	5.0	3.3	6.0	4.0	7.5	5.0	10	6.7	15	10
Harding grass (<i>Phalaris tuberosa</i>)	4.6	3.1	5.9	3.9	7.9	5.3	11	7.4	18	12
Fescue, tall (<i>Festuca elatior</i>)	3.9	2.6	5.5	3.6	7.8	5.2	12	7.8	20	13
Wheatgrass, standard crested (<i>Agropyron sibiricum</i>)	3.5	2.3	6.0	4.0	9.8	6.5	16	11	28	19
Vetch, common (<i>Vicia angustifolia</i>)	3.0	2.0	3.9	2.6	5.3	3.5	7.6	5.0	12	8.1
Sudan grass (<i>Sorghum sudanense</i>)	2.8	1.9	5.1	3.4	8.6	5.7	14	9.6	26	17
Wildrye, beardless (<i>Elymus triticoides</i>)	2.7	1.8	4.4	2.9	6.9	4.6	11	7.4	19	13
Cowpea (forage) (<i>Vigna unguiculata</i>)	2.5	1.7	3.4	2.3	4.8	3.2	7.1	4.8	12	7.8
Trefoil, big (<i>Lotus uliginosus</i>)	2.3	1.5	2.8	1.9	3.6	2.4	4.9	3.3	7.6	5.0
Sesbania (<i>Sesbania exaltata</i>)	2.3	1.5	3.7	2.5	5.9	3.9	9.4	6.3	17	11
Sphaerophysa (<i>Sphaerophysa salsula</i>)	2.2	1.5	3.6	2.4	5.8	3.8	9.3	6.2	16	11
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	2.0	1.3	3.4	2.2	5.4	3.6	8.8	5.9	16	10
Lovegrass (<i>Eragrostis</i> sp.) ¹⁴	2.0	1.3	3.2	2.1	5.0	3.3	8.0	5.3	14	9.3
Corn (forage) (maize) (<i>Zea mays</i>)	1.8	1.2	3.2	2.1	5.2	3.5	8.6	5.7	15	10
Clover, berseem (<i>Trifolium alexandrinum</i>)	1.5	1.0	3.2	2.2	5.9	3.9	10	6.8	19	13
Orchard grass (<i>Dactylis glomerata</i>)	1.5	1.0	3.1	2.1	5.5	3.7	9.6	6.4	18	12
Foxtail, meadow (<i>Alopecurus pratensis</i>)	1.5	1.0	2.5	1.7	4.1	2.7	6.7	4.5	12	7.9
Clover, red (<i>Trifolium pratense</i>)	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
Clover, alsike (<i>Trifolium hybridum</i>)	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
Clover, ladino (<i>Trifolium repens</i>)	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
Clover, strawberry (<i>Trifolium fragiferum</i>)	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6

Tolérance des cultures fruitières à la salinité des eaux d'irrigation ou des sols (extrait)

FRUIT CROPS ¹⁵										
Date palm (<i>Phoenix dactylifera</i>)	4.0	2.7	6.8	4.5	11	7.3	18	12	32	21
Grapefruit (<i>Citrus paradisi</i>) ¹¹	1.8	1.2	2.4	1.6	3.4	2.2	4.9	3.3	8.0	5.4
Orange (<i>Citrus sinensis</i>)	1.7	1.1	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8.0	5.3
Peach (<i>Prunus persica</i>)	1.7	1.1	2.2	1.5	2.9	1.9	4.1	2.7	6.5	4.3
Apricot (<i>Prunus armeniaca</i>) ¹¹	1.6	1.1	2.0	1.3	2.6	1.8	3.7	2.5	5.8	3.8
Grape (<i>Vitis</i> sp.) ¹¹	1.5	1.0	2.5	1.7	4.1	2.7	6.7	4.5	12	7.9
Almond (<i>Prunus dulcis</i>) ¹¹	1.5	1.0	2.0	1.4	2.8	1.9	4.1	2.8	6.8	4.5
Plum, prune (<i>Prunus domestica</i>) ¹¹	1.5	1.0	2.1	1.4	2.9	1.9	4.3	2.9	7.1	4.7
Blackberry (<i>Rubus</i> sp.)	1.5	1.0	2.0	1.3	2.6	1.8	3.8	2.5	6.0	4.0
Boysenberry (<i>Rubus ursinus</i>)	1.5	1.0	2.0	1.3	2.6	1.8	3.8	2.5	6.0	4.0
Strawberry (<i>Fragaria</i> sp.)	1.0	0.7	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	4	2.7

Sensibilité pour la germination et la levée

- Les cultures présentent généralement une sensibilité accrue pendant la phase de germination, de levée et les premiers stades de développement
- Nécessité d'une attention particulière portée au lessivage des sels initialement présents dans les horizons de surface (suite à une période prolongée sans pluie ni irrigation)

29

Exemple : Tolérance de cultures à la salinité au cours de la période de germination

Crop		50 percent Emergence reduction (ECe in ds/m)
Barley	(<i>Hordeum vulgare</i>)	16 – 24
Cotton	(<i>Gossypium hirsutum</i>)	15.5
Sugarbeet	(<i>Beta vulgaris</i>)	6 – 12.5
Sorghum	(<i>Sorghum bicolor</i>)	13
Safflower	(<i>Carthamus tinctorius</i>)	12.3
Wheat	(<i>Triticum aestivum</i>)	14 – 16
Beet, red	(<i>Beta vulgaris</i>)	13.8
Alfalfa	(<i>Medicago sativa</i>)	8.2 – 13.4
Tomato	(<i>Lycopersicon lycopersicum</i>)	7.6
Rice	(<i>Oryza sativa</i>)	18
Cabbage	(<i>Brassica oleracea capitata</i>)	13
Muskmelon	(<i>Cucumis melo</i>)	10.4
Maize	(<i>Zea mays</i>)	21 – 24
Lettuce	(<i>Lactuca sativa</i>)	11.4
Onion	(<i>Allium cepa</i>)	5.6 – 7.5
Bean	(<i>Phaseolus vulgaris</i>)	8.0

30

A. Bases d'évaluation des risques et impacts liés à la salinité

3. Aperçu sur les mécanismes associés aux impacts de la salinité

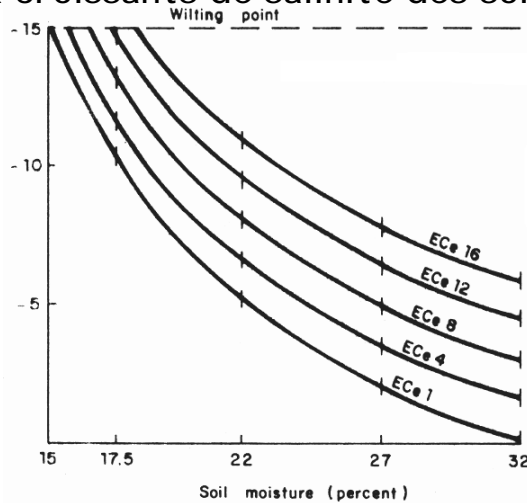
31

Premier principe

- L'augmentation de la salinité conduit à une diminution du potentiel de l'eau du sol sous l'effet du potentiel osmotique (cf. figure)
- Son effet est d'autant plus important que le sol s'assèche et que la concentration des sels augmentent
- Ce mécanisme contribue à une diminution de la « disponibilité » en eau du sol pour la culture qui doit fournir un « effort » plus important pour son extraction
- La quantité d'eau utilisable, ou facilement utilisable, par la culture est réduite, le stress apparaît plus précocement

32

Courbe de rétention en eau en fonction de niveaux croissants de salinité des sols (ECe)



Source : FAO, Bulletin d'irrigation et drainage 29 rev. 1 (Ayers et Westcot, 1994)
<http://www.fao.org/DOCREP/003/T0234E/T0234E00.htm>

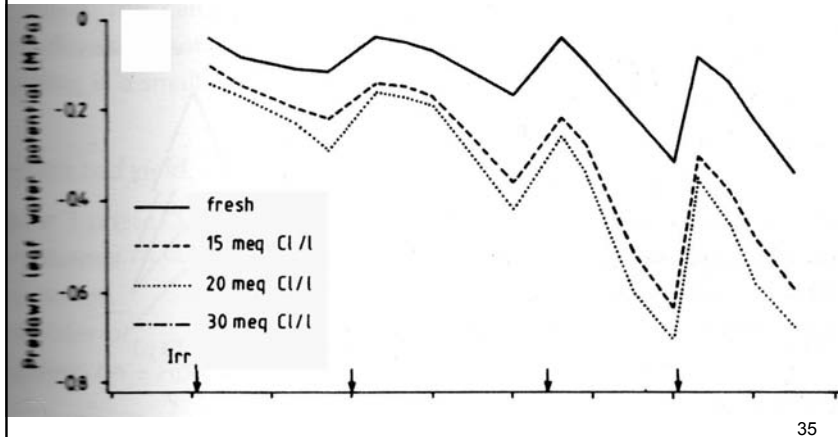
33

Second principe

- La diminution du potentiel de l'eau du sol s'accompagne d'une baisse du potentiel foliaire de base de la culture (valeur maximale du potentiel foliaire mesuré au levée du jour). L'augmentation diurne du potentiel foliaire est accélérée sous l'effet de la salinité
- La plante réagit alors par la fermeture de ses stomates (diminution de la conductance stomatique) dans le but de réduire ses pertes en eau (effet similaire à celui d'un stress hydrique)
- La fermeture des stomates réduit non seulement les échanges de vapeurs d'eau, mais aussi les échanges de CO_2 et la photosynthèse
- Il en découle, généralement avec un certain retard, un effet dépressif sur la production de matière sèche, la croissance et le rendement

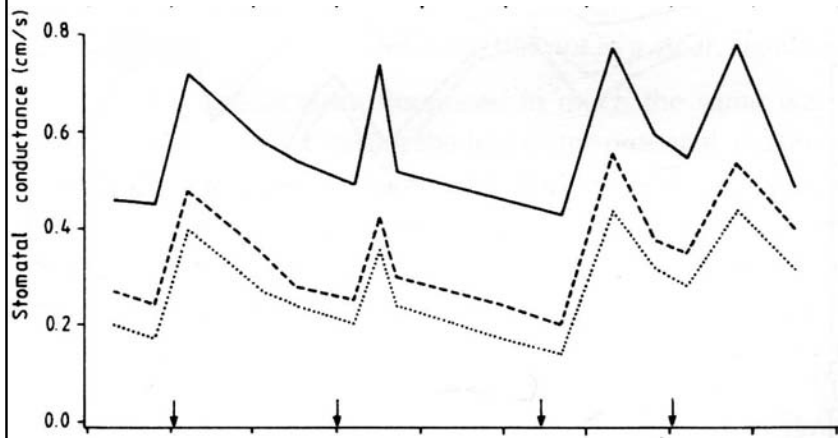
34

Effet du stress hydrique et de la salinité sur l'évolution du potentiel foliaire de base (pomme de terre)



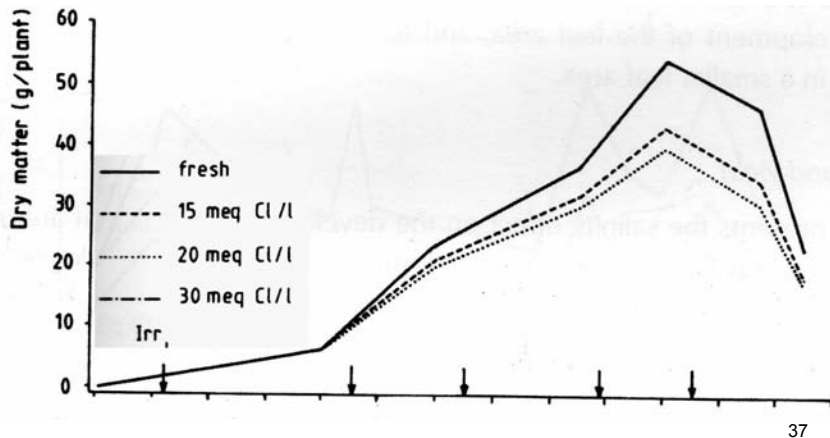
35

Effet du stress hydrique et de la salinité sur l'évolution de la conductance stomatique (pomme de terre)



36

Effet du stress hydrique et de la salinité sur la production de matière sèche (pomme de terre)



37

Autres principes

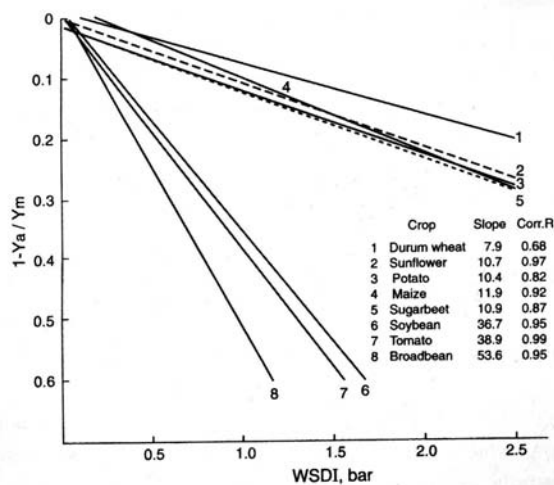
- L'effet dépressif de la salinité est généralement bien corrélé à un indicateur de stress hydrique (ex : WSDI - Water Stress Day Index)

$$WSDI = \frac{\sum_1^n (\psi_c - \psi_s)}{n}$$

- Avec ψ_s et ψ_c les n potentiels de base journaliers de plantes stressées ou non stressé (control)
- Un des principaux mécanismes physiologique d'adaptation, qualifié d' «ajustement osmotique», consiste pour la plante à privilégier la pression turgescente et l'ouverture de ses stomates
- Certaines cultures (tomate,...) dispose de capacités d'adaptation pour maintenir la production de biomasse tandis que la production de fruits, en nombre et en calibre, est malgré tout affectée par la salinité

38

Exemple : baisse de rendements de quelques cultures en fonction du WSDI



39

Autres principes (suites)

- La sensibilité à ce stress osmotique (et de façon similaire au stress hydrique) est accrue lorsque la demande évaporative est élevée.
- L'effet de la salinité est donc plus faible pour les cultures hivernales
- Ce phénomène est en mesure de modifier la classification antérieure réalisée sur des bases expérimentales où les deux effets de confondent
- Ces mécanismes mettent en lumière la principe selon lequel la conduite des irrigations avec une eau salée nécessite une fréquence d'irrigation plus élevée, et ce d'autant plus que la demande évaporative est élevée

40

Autres mécanismes

- Risques additionnels de toxicité en Chlore ou sodium, variable selon les cultures :
 - Les plantes sensibles accumulent et meurent
 - Les plantes tolérantes contiennent de grandes quantités mais survivent (mécanismes physiologiques de compartimentage, ...)
- Mais aussi de désordre nutritionnel : antagonisme entre le prélèvement d'éléments minéraux (K^+/Na^+ , NO_3^-/Cl^-)
- Nombreux gènes impliqués et mise au point de variétés adaptées difficiles

41

A. Bases d'évaluation des risques et impacts liés à la salinité

4. Influence des modes de conduite de l'irrigation

42

Irrigation gravitaire par calant ou par bassin

- Un accroissement des teneur en sels vers le bas du profil de sol en condition d'irrigation et de lessivage ; ou:
- Un accroissement des teneurs en sels vers le haut du profil de sol en condition de «sous-irrigation», absence de lessivage ou après une longue période sans irrigation (inter culture), notamment en présence d'une nappe superficielle
- Une fréquence généralement faible des irrigations favorisant la concentration des sels dans l'horizon racinaire entre les irrigations = **nécessité d'un accroissement de la fréquence ou des doses d'irrigation en condition d'utilisation d'eau salée**
- Uniformité souvent faible des apports d'eau d'irrigation et de la répartition spatiale des sels à l'échelle de la parcelle
- **Situation standard décrite dans les exemples précédents**

43

Irrigation gravitaire à la raie

- Lessivage hétérogène : élevé à l'aplomb de la raie d'irrigation, et faible à l'aplomb du billon ou de la planche, sous l'influence de la répartition des eaux d'irrigation et de pluie
- Concentration des sels sur le billon par remontée capillaire
- Des pratiques culturales adaptées, notamment pour le semis (ou le repiquage) sur le flanc du billon (à la limite de la zone humectée par les irrigations)
- Une situation similaire aux irrigations gravitaires par calant ou bassin pour ce qui concerne les doses et fréquences d'irrigation, ou encore l'uniformité des apports d'eau d'irrigation et la répartition spatiale des sels à l'échelle de la parcelle

44

Irrigation par aspersion

- Une répartition des sels similaires à celle des irrigations gravitaires par calant ou bassin, mais :
- Des doses généralement plus faibles et une fréquence des irrigations plus élevée
- Des contraintes spécifiques liées à l'humectation du feuillage et aux risques de toxicité du chlorure et du sodium au contact du feuillage en condition d'utilisation d'eau salée
- Une vocation plus spécifiquement orientée vers les irrigations complémentaires aux pluies en saison hivernale sur grande culture

45

Irrigation localisé : goutte à goutte, ... (1)

- Une forme du « bulbe d'irrigation » et une répartition des sels spécifiques en fonction de la nature des sols (perméabilité, sorptivité) et de la conduite des irrigations (débit, dose,...)
- Le bulbe d'irrigation est généralement plus « large » sur des sols argileux, et avec un débit faible des goutteurs
- Le bulbe d'irrigation est généralement plus « étroit » sur sols sableux et avec un débit élevé des goutteurs
- La taille du bulbe d'irrigation est généralement plus importante avec l'apport de doses élevées
- Adapter les caractéristiques du matériel et les modalités de conduite en fonction du sol et de la culture

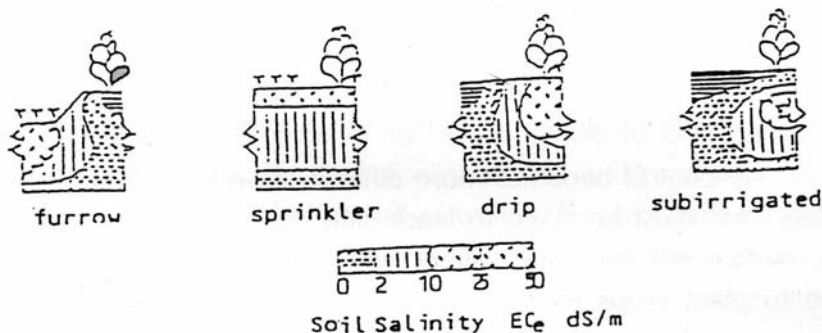
46

Irrigation localisé : goutte à goutte, ... (2)

- La concentration des sels est maximale :
- A la surface du sol en périphérie des goutteurs. Privilégier le semis ou le repiquage à proximité des goutteurs. Attention : une forte pluie peut favoriser la mobilité des sels vers la zone racinaire.
- En périphérie du bulbe d'irrigation correspondant généralement au développement du système racinaire. Assurer à la fois une dose et une fréquence suffisantes pour repousser les sels en périphérie de la zone racinaire, et éviter la concentration excessive de sels à proximité des racines
- Attention en condition d'irrigation avec des eaux salées : conduite stable des irrigations pour placer la culture dans des conditions optimales + Risque induit de surconsommation en condition de dose et fréquence optimales pour la culture

47

Influence du mode d'irrigation



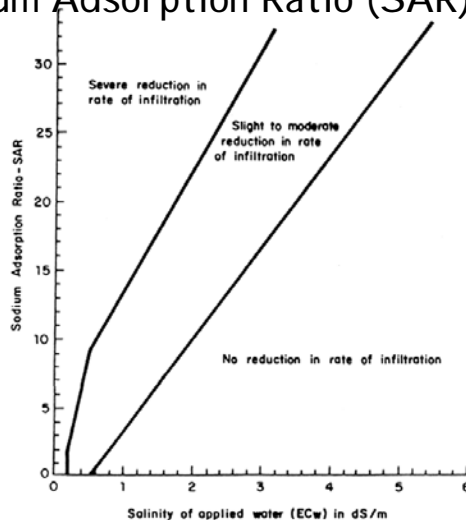
48

A. Bases d'évaluation des risques et impacts liés à la salinité

5. Quelques éléments de bases sur la sodicité et l'alcalinité

49

Diminution relative du régime d'infiltration en fonction de la salinité et du Sodium Adsorption Ratio (SAR)



50

Limites du SAR comme indicateur de risque de la dégradation

- Le Sodium Adsorption Ratio (SAR) apparaît relativement pertinent pour évaluer les risques de sodisation (alcalisation) des sols salés neutres, mais:
- Ne rend pas compte des mécanismes de la dégradation des propriétés physiques des sols par sodisation
- Présente des lacunes pour certaines qualités d'eau d'irrigation (ou de nappe) carbonatée ou sulfatée

51

Dégradation des sols sodiques

- Le dégradation résulte de l'augmentation progressive de la proportion de sodium sur le complexe d'échange.
- A partir d'une valeur seuil de 5 à 15% (en fonction du sol et de la concentration de la solution), les agrégats deviennent instables et les propriétés physiques sont susceptibles de se dégrader. La dégradation se manifeste :
- A court terme après l'apport d'eau peu concentrée : encroûtement à l'état sec et baisse de perméabilité à l'état humide ;
- A beaucoup plus long terme par une augmentation de la densité apparente et de la compacité, une diminution de la perméabilité et le développement de conditions anoxiques

52

Gestion de la sodicité

- Les processus de dégradation du profil de sol sont progressifs mais à terme peu réversibles (contrairement à la salinité)
- La réhabilitation est coûteuse et nécessite généralement un lessivage important associé à diverses interventions complémentaires :
 - Amendement chimiques
 - Intervention physique : sous-solage, drainage
 - Méthodes biologiques : cultures améliorantes (enracinement dense) et tolérantes à l'engorgement
- Prévention essentielle
- Tolérance des cultures plutôt liée à leur capacité d'adaptation au sol compact ou à l'asphyxie

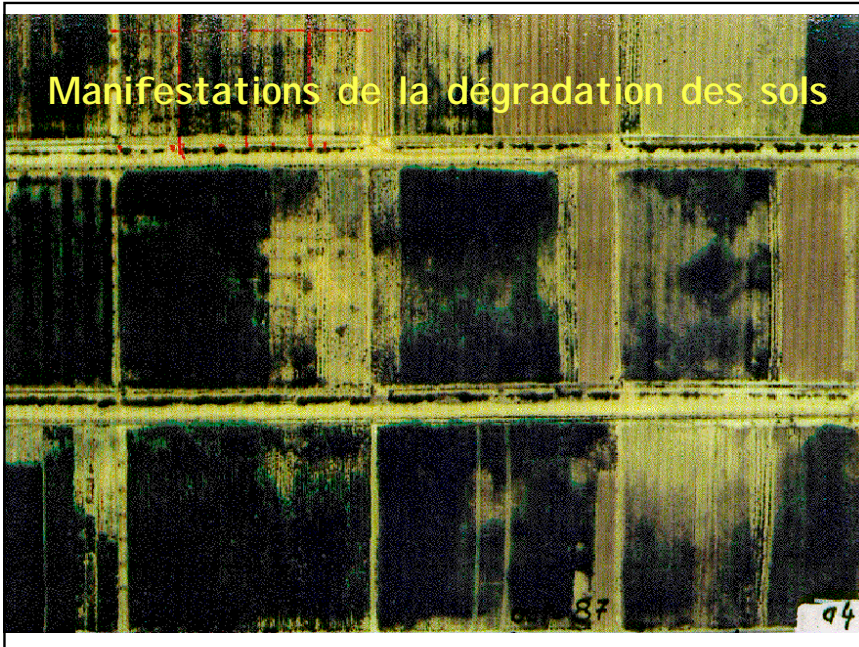
53

Tolérance des cultures à la sodicité des sols

	Sensitive		Semi-tolerant		Tolerant
Avocado	(Persea americana)	Carrot	(Daucus carota)	Alfalfa	(Medicago sativa)
Deciduous Fruits		Clover, Ladino	(Trifolium repens)	Barley	(Hordeum vulgare)
Nuts		Dallisgrass	(Paspalum dilatatum)	Beet, garden	(Beta vulgaris)
Bean, green	(Phaseolus vulgaris)	Fescue, tall	(Festuca arundinacea)	Beet, sugar	(Beta vulgaris)
Cotton (at germination)	(Gossypium hirsutum)	Lettuce	(Lactuca sativa)	Bermuda grass	(Cynodon dactylon)
Maize	(Zea mays)	Bajara	(Pennisetum typhoides)	Cotton	(Gossypium hirsutum)
Peas	(Pisum sativum)	Sugarcane	(Saccharum officinarum)	Paragrass	(Brachiaria mutica)
Grapefruit	(Citrus paradisi)	Berseem	(Trifolium alexandrinum)	Rhodes grass	(Chloris gayana)
Orange	(Citrus sinensis)	Benji	(Medicago parviflora)	Wheatgrass, crested	(Agropyron cristatum)
Peach	(Prunus persica)	Raya	(Brassica juncea)	Wheatgrass, fairway	(Agropyron cristatum)
Tangerine	(Citrus reticulata)	Oat	(Avena sativa)	Wheatgrass, tall	(Agropyron elongatum)
Mung	(Phaseolus aures)	Onion	(Allium cepa)	Karnal grass	(Diplachna fusca)
Mash	(Phaseolus mungo)	Radish	(Raphanus sativus)		
Lentil	(Lens culinaris)	Rice	(Oryza sativa)		
Groundnut (peanut)	(Arachis hypogaea)	Rye	(Secale cereale)		
Gram	(Cicer arietinum)	Ryegrass, Italian	(Lolium multiflorum)		
Cowpeas	(Vigna sinensis)	Sorghum	(Sorghum vulgare)		
		Spinach	(Spinacia oleracea)		
		Tomato	(Lycopersicon esculentum)		
		Vetch	(Vicia sativa)		
		Wheat	(Triticum vulgare)		

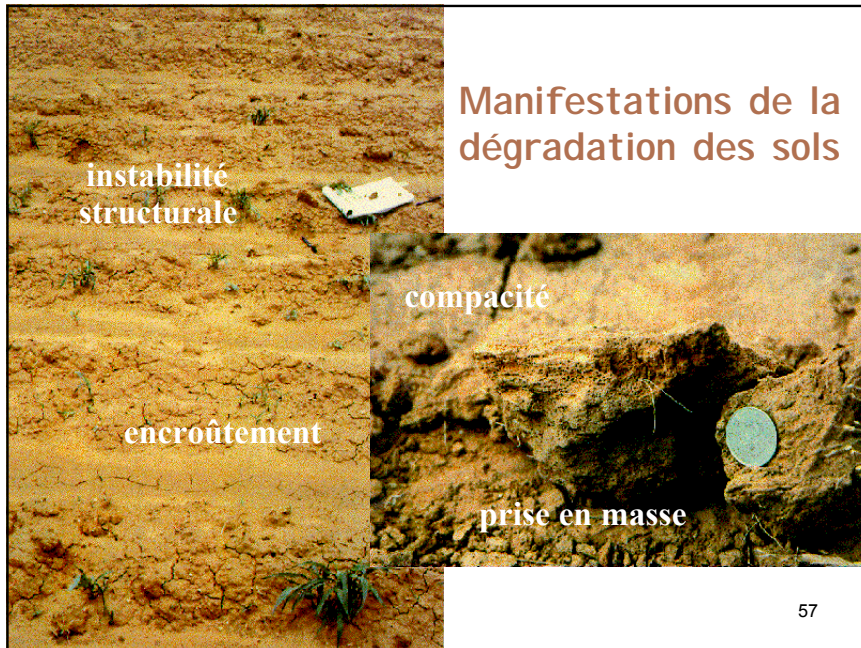
54

Manifestations de la dégradation des sols



Manifestations de la dégradation des sols





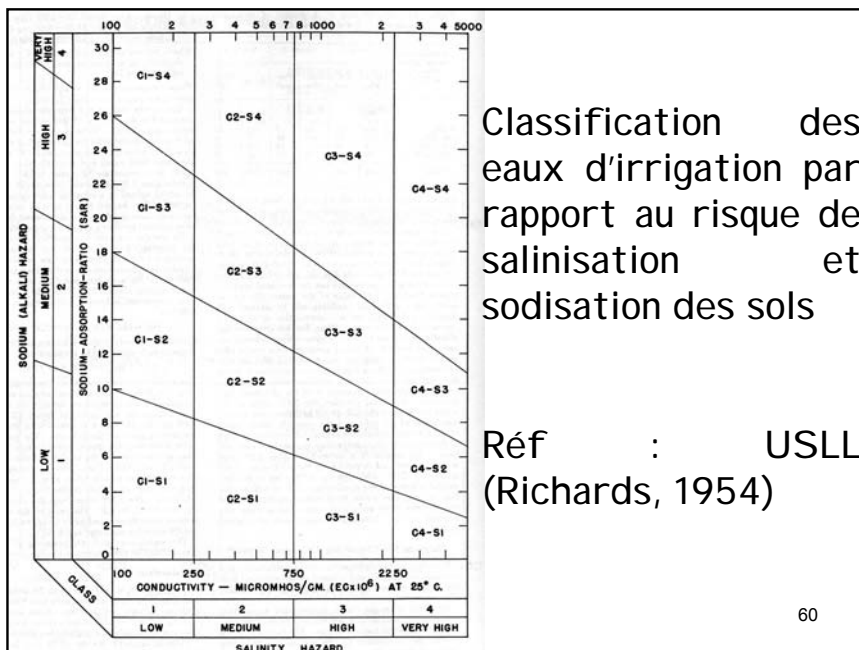
Alcalinité – Alcalinisation : rapide aperçu

- Processus d'alcalinisation lié à des eaux carbonatées, généralement non salées (boucliers anciens fortement lessivés en Afrique de l'ouest, Inde, Australie, ...)
- Se manifeste par une augmentation du pH (et des risques accrus d'alcalisation=sodisation)
- Les pH élevés s'accompagnent de carences induites, en phosphore et Zinc notamment. Favorise la volatilisation d'ammoniac lors des apports d'engrais azotés
- Phénomènes absents en Tunisie (?)

A. Bases d'évaluation des risques et impacts liés à la salinité

6. Évaluation de la qualité des eaux pour l'irrigation

59



60

Table 1 GUIDELINES FOR INTERPRETATIONS OF WATER QUALITY FOR IRRIGATION¹

Potential Irrigation Problem		Units	Degree of Restriction on Use		
			None	Slight to Moderate	Severe
Salinity (affects crop water availability) ¹					
	EC _w	dS/m	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
	(or)				
	TDS	mg/l	< 450	450 – 2000	> 2000
Infiltration (affects infiltration rate of water into the soil. Evaluate using EC _w and SAR together) ²					
	SAR = 0 – 3				
	and EC _w =				
	= 3 – 6		> 0.7	0.7 – 0.2	< 0.2
	= 6 – 12		> 1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
	= 12 – 20		> 1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
	= 20 – 40		> 2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
	= 40 – 60		> 5.0	5.0 – 2.9	< 2.9
Specific Ion Toxicity (affects sensitive crops)					
	Sodium (Na)³				
	surface irrigation	SAR	< 3	3 – 9	> 9
	sprinkler irrigation	me/l	< 3	> 3	
	Chloride (Cl)⁴				
	surface irrigation	me/l	< 4	4 – 10	> 10
	sprinkler irrigation	me/l	< 3	> 3	
	Boron (B)⁵	mg/l	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
	Trace Elements (see Table 21)				
Miscellaneous Effects (affects susceptible crops)					
	Nitrogen (NO₃ - N)⁶	mg/l	< 5	5 – 30	> 30
	Bicarbonate (HCO₃)				
	(overhead sprinkling only)	me/l	< 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5
	pH		Normal Range 6.5 – 8.4		

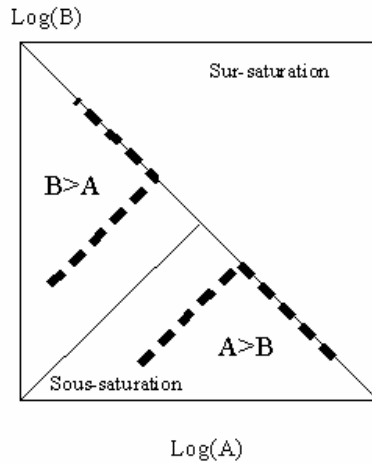
Source : FAO, Bulletin d'irrigation et drainage 29 rev. 1 (Ayers et Westcot, 1994)
<http://www.fao.org/DOCREP/003/T0234E/T0234E00.htm>

61

Quelques éléments plus avancés dans la
connaissance des mécanismes
d'évolution des sols et l'évaluation de la
qualité des eaux

Évolution de la composition du sol suite à la précipitation d'un minéral : loi du T

- Lorsqu'un minéral AB précipite, A et B ne peuvent augmenter simultanément car le produit de solubilité Q :
 $Q = (A) \cdot (B)$ reste constant
- Si $A > B$, A augmente et B diminue
- Si $B > A$, B augmente et A diminue



63

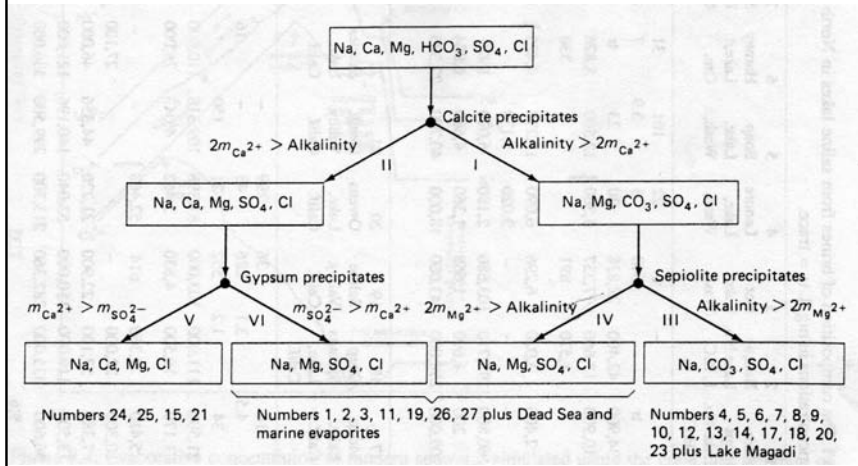
Evaluation de la qualité des eaux pour l'irrigation - Concept d'alcalinité résiduelle

- Quand la calcite précipite (CaCO_3), l'alcalinité (carbonates) et le calcium ne peuvent augmenter simultanément. Ce concept d'alcalinité résiduelle a été généralisé à la précipitation successive de plusieurs minéraux [Van Beek and Van Breemen, 1973; Al Droubi et al., 1980]
- L'alcalinité résiduelle est calculée en soustrayant les charges de cations et en ajoutant celle d'anions, impliqués dans les précipitations, à l'alcalinité. Elle est souvent considérée par rapport à la calcite et la sépiolite (silicate de Magnésium) = **Residual Sodium Carbonates (RSC)**

$$RSC = \text{Alcalinité} - 2Ca - 2Mg \quad (\text{eq/l})$$

64

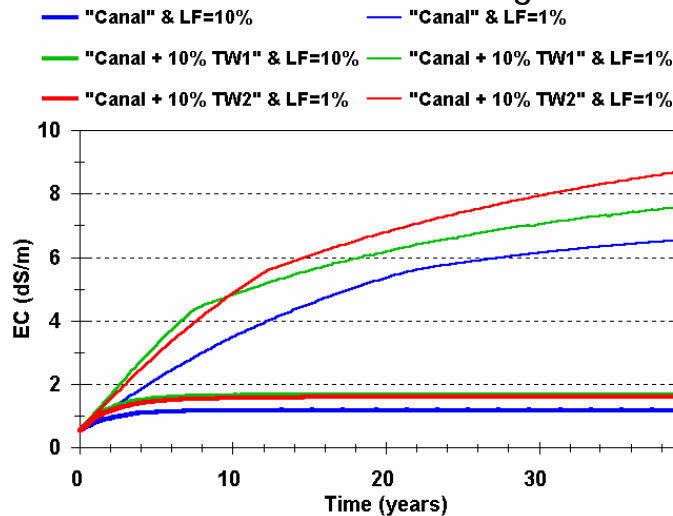
Différents « passages » possibles pour l'évaporation des eaux naturelles, en fonction du modèle de Hardie and Eugster (1970), cité par Appelo et Postma (1994)



Modélisation du fonctionnement géochimique *IRRICHEM*

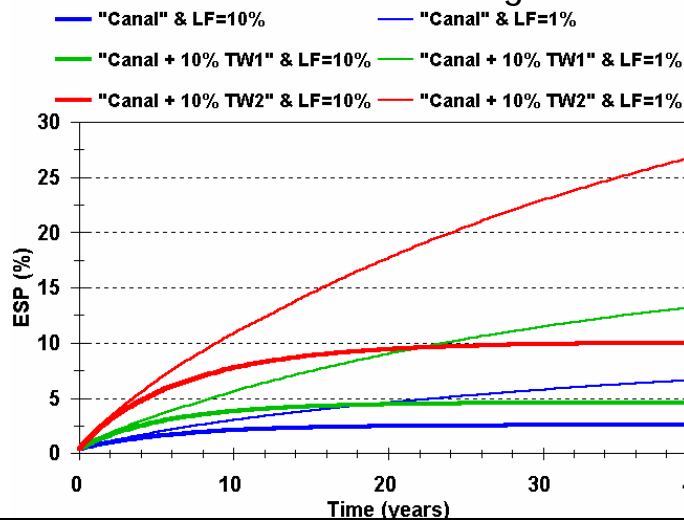
- Simulation des mécanismes géochimiques : spéciation en solution, précipitation ou dissolution de minéraux et échanges de cations
- Simulation de scénarios simples concernant la qualité des eaux et le fonctionnement hydrologique (fraction de lessivage) et ses conséquences sur :
 - La composition de la solution du sol et la salinité
 - Le stock de minéraux (Calcite, Silice amorphe, Sépiolite, Gypse, ...)
 - La composition du complexe d'échange et la sodicité

Exemple: Evolution de la salinité (Simulation)
en fonction de la qualité des eaux et de la
fraction de lessivage



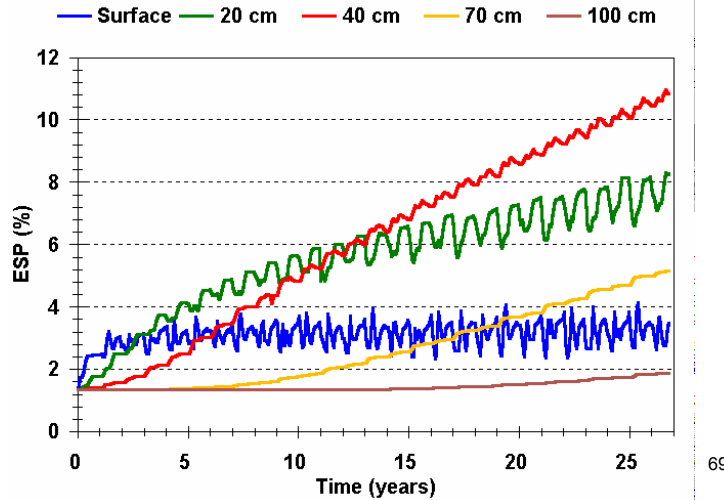
67

Exemple : Evolution de la sodicité (Simulation)
en fonction de la qualité des eaux et de la
fraction de lessivage



68

Simulation (tendance prévisionnelle) de l'évolution des sols sous irrigation : Sodicité



69

B. Méthode d'approche pour la Gestion et le contrôle de la salinité

1. Présentation des acteurs de la gestion de la salinité

70

Rôle des acteurs et institutions pour la durabilité des systèmes irrigués

- Les acteurs (et institutions) sont ici abordés au travers les fonctions qu'ils exécutent pour assurer un équilibre entre productivité de l'eau et protection de l'environnement sur le long terme
- Les premiers acteurs des systèmes irrigués sont les agriculteurs, dans leur diversité. Leur finalité est l'amélioration des performances économiques et sociales de leur exploitation.
- L'économie d'eau ou la protection de l'environnement ne sont que des aspects indirects de leur activité, et il incombe à d'autres intervenants d'accompagner la mise en œuvre de politiques de développement plus durables : politique, gestionnaire d'aménagement, association d'usagers, ...

71

Rôle du politique

- Le développement durable par la valorisation et la préservation de l'eau et des sols en tant que biens collectifs
- Établir un cadre légal et organisationnel pour la définition des droits et devoirs des différents acteurs
- Contribution à la recherche d'un équilibre entre productivité de l'eau et préservation des ressources au travers des investissements, des politiques réglementaires ou des incitations économiques (tarification, subvention, pénalités, ...).
- NB : Les réformes ne sont que rarement initiées au niveau des aménagements, et nécessitent généralement des incitations (accord explicite, financements, ...) de la part du politique

72

Rôle des gestionnaires d'aménagement et/ou responsables du développement agricole

- Mise en œuvre des politiques publiques
- Assurer la maintenance des aménagements collectifs, la distribution efficiente et équitable de l'eau
- Suivre et évaluer les performances hydrauliques, agronomiques, économiques, et environnementales de l'agriculture irriguée.
- Un effort particulier vers la dissémination de technologies et pratiques efficientes ... Au travers la vulgarisation, le conseil et la formation

73

Rôle des associations d'usagers

- L'émergence d'associations d'usagers de l'eau (GIC) est un moyen pour mieux impliquer ou associer les exploitations agricoles dans les différents domaines de la gestion des aménagements
- ... Et un moyen de réduire le coût et/ou l'efficacité de leur gestion
- Quelles attributions, quels rythmes et quelles mesures d'accompagnement (incitation, organisation, formation, ...) pour le transfert de tâches et responsabilités auprès d'associations d'usagers, y compris dans le domaine de la gestion de (l'eau et de) la salinité ?

74

B. Méthode d'approche pour la Gestion et le contrôle de la salinité

2. Démarche proposée

75

« Gestion de la salinité »

- Sous le terme de gestion, on se réfère plutôt à un ensemble d'interventions des acteurs (exploitants agricoles, gestionnaires d'aménagement, développement agricole) pour une amélioration des performances des systèmes irrigués : productivité de l'eau, durabilité des exploitations, maintenance des aménagements, préservation des ressources naturelles
- Lorsque la salinité représente un facteur de risque élevé, elle joue un rôle déterminant pour la définition des objectifs d'une « bonne gestion »
- Facteurs de risques : qualité des eaux, qualité des sols, niveau de la nappe, ...

76

Contrôle et gestion de la salinité

- Il n'existe pas de voie unique pour un meilleur contrôle de la salinité, mais différentes approches et pratiques alternatives qui peuvent être combinées en fonction du contexte. De nombreuses interactions, en synergie mais parfois aussi en antagonisme
- Il n'existe pas de solution optimale, mais des trajectoires possibles vers de meilleures performances de gestion qui doivent être périodiquement actualisées
- A la base, trois types de contribution semblent nécessaires pour alimenter la démarche générale :

77

Méthode

1. Analyser et comprendre les comportements des acteurs, agriculteurs mais aussi parfois gestionnaires et encadrement, et en comprendre la «*rationalité*» ... pour une vision partagée de la situation actuelle
2. Comprendre (et représenter) les processus et leurs déterminants en fonction des pratiques et décisions des gestionnaires et des agriculteurs ... pour une évaluation *a priori* des différentes options et de leurs conséquences sur la durée
3. Concevoir et mettre en œuvre des démarches participatives d'accompagnement associant les différents acteurs et institutions en charge de leur application ... pour promouvoir l'émergence et organiser la dissémination d'innovations efficaces et fiables

78

Outils privilégiés

- Analyse et compréhension des pratiques des agriculteurs, comme préalable à une amélioration progressive de leurs performances
- Mise en place de dispositifs pour la caractérisation et le suivi de l'évolution de la salinité des sols et des performances des systèmes de cultures
- *(Une démarche similaire à l'échelle des aménagements qui ne sera pas abordé ici)*

79

B. Méthode d'approche pour la Gestion et le contrôle de la salinité

3. Analyse et amélioration des pratiques des agriculteurs

80

Comportement des agriculteurs et impact (1)

- Pour l'agriculteur, il s'agit d'améliorer les performances techniques et économiques, et garantir la durabilité de son exploitation (voire assurer une certaine promotion sociale)
- Hypothèse : les agriculteurs adoptent des comportements rationnels pour prévenir ou atténuer les effets de la salinité, y compris et surtout dans les situations défavorables
- Vis-à-vis de la salinité, comment l'exploitant parvient-il à maintenir (ou pas) un niveau optimal de performance en adaptant son système de production : choix des spéculations, reconversion des systèmes d'irrigation, pratiques agricoles, ... ?

81

Comportement des agriculteurs et impact (2)

- Analyser et comprendre ces comportements dans toutes leurs dimensions (interdisciplinarité). Ils peuvent varier :
- En fonction du contexte technique: qualité des eaux, types de systèmes de culture (plante, technique d'irrigation, ...), ...
- Mais aussi en fonction d'autres déterminants externes : type d'exploitation, statut économique et foncier, sécurité et flexibilité du système de distribution, ...
- Établir le dialogue sur la base d'une vision partagée et rechercher les voies d'une amélioration des performances avec la participation des agriculteurs
- Remarque : Les pratiques des agriculteurs ne sont pas forcément les plus performantes ni les plus durables, mais elles sont la conséquence d'un processus d'adaptation qui doit être pris en compte

82

De nombreux facteurs et options pour
le contrôle de la salinité à l'échelle de la
parcelle ...

... Un catalogue à adapter à
chaque contexte !

83

Facteurs et options hydrauliques (1)

- Améliorer l'efficacité et l'uniformité de la distribution de l'eau.
- Améliorer le planage et sa maintenance en irrigation gravitaire.
- Adapter les pratiques en matière d'irrigation et de lessivage (dose/fréquence) en fonction de la salinité :
 - Adapter les doses d'irrigation aux besoins de la plantes et au lessivage, sans excès
 - Adapter la fréquence des irrigations à la capacité des sols et à la salinité (réduction du stress osmotique)
 - Adopter une stratégie pour le lessivage, initial, à certains stades et/ou continu

84

Facteurs et options hydrauliques (2)

- Optimiser globalement le choix des techniques et la conduite des irrigations en fonction des cultures, du sol, de la salinité, ... Mais aussi des contraintes induites par le climat, la disponibilité de la ressource en eau, ... :
 - Évaluer le rôle des pluies (hivernales) pour le lessivage à l'échelle de la parcelle
 - Analyser les pompages à l'échelle de l'exploitation comme une contribution au drainage (vertical) et une opportunité d'accroissement de la flexibilité (et d'intensification)
 - Évaluer les conséquences résultant de mécanismes antagonistes liés à l'augmentation du lessivage et au recours à des eaux de moins bonne qualité (risque de dégradation secondaire)
 - ...

85

Facteurs et options agronomiques (1)

- Analyser l'influence de la salinité sur le choix des cultures et systèmes de culture, les assolements, les superficies cultivées, ...
- Évaluer les conséquences directes de la salinité sur les rendements et la qualité des productions agricoles
- ...mais aussi ses conséquences indirectes sur la consommation et la productivité de l'eau, l'adaptation des cultures et des pratiques,..., et *in fine*, la rentabilité des exploitations.
- Évaluer plus en terme de rentabilité et productivité de l'eau qu'en terme d'effet sur le rendement
- Distinguer l'effet moyen (échelle de la parcelle) et l'apparition de symptômes localement dans les zones les plus affectées
- Distinguer les effets de la salinité d'éventuels autres effets liés à l'engorgement, à la fertilité, à l'état phytosanitaire, ...

86

Facteurs et options agronomiques (2)

- Identifier les pratiques alternatives des agriculteurs pour le contrôle des effets de la salinité : mulch, amendements organiques et minéraux, fertigation, biodrainage, ..., (strates de culture à l'exemple des systèmes oasiens), ...
- ... Puis promouvoir certaines techniques adaptées au contexte et contribuant à minimiser l'effet de la salinité.
- Prévenir plus spécifiquement les excès de sels dans le lit de semis, ... et évaluer les effets sur la germination (salinité) et la levée (sodicité et risque d'encroûtement)
- Prospector pour des usages alternatifs des sols salés lorsque les agriculteurs ne sont plus en mesure d'en contrôler les effets : plantes halophytes pour la production de biomasse, ...

87

B. Méthode d'approche pour la Gestion et le contrôle de la salinité

4. Conception et mise en œuvre de dispositifs d'observation

88

Conception de dispositifs de suivi (1)

- Un consensus sur la mise en place de dispositifs de suivi ... mais pour quoi faire ?
- A quels effet s'intéresse-t-on : Effet sur les sols, les eaux, les cultures, les performances technico-économiques des exploitations, la productivité de la terre, des eaux, des investissements, ... ?
- Quels indicateurs pour les décrire ?
 - Une grande variabilité spatiale aux différentes échelles
 - Des évolutions souvent non linéaires en fonction des modalités de gestion des systèmes de culture, de la gestion de l'irrigation (et du drainage), des variations interannuelles du climat, ...
- Une analyse initiale des facteurs de risques pour identifier les périmètres, les secteurs et les hypothèses à privilégier (préalable à la conception de dispositifs).

89

Conception de dispositifs de suivi (2)

- Des pratiques variables des agriculteurs qui tentent et parviennent souvent à réduire ou contourner les effets de la salinité :
 - Caractérisation de la diversité des pratiques
 - Quel « coût » de ces adaptations ?
 - Évaluation globale de leurs effet sur les performances et la rentabilité des cultures
- Il n'existe pas de solutions universelles mais des stratégies adaptées aux différents contextes.
- Pour devenir un outil efficace, les dispositifs de suivi doivent être intégrés aux politiques de développement agricole et/ou de gestion des aménagements ... et adaptés aux capacités des organismes en charge du suivi

90

Objectifs des dispositifs de suivi

- Comprendre l'organisation spatiale de la salinité à l'échelle de la parcelle et/ou de l'aménagement : influence de la topographie, de la distribution de l'eau et du drainage (amont/aval), ... et réaliser un premier diagnostic
- Suivre les évolutions temporelles, en tendance, de la salinité ... et évaluer les hypothèses quant au fonctionnement et aux évolutions du système :
 - Évaluer l'influence des pratiques sur les ressources naturelles et les performances, ou :
 - Analyser *a contrario* l'évolution des pratiques en fonction d'une accentuation éventuelle des contraintes (salinité des sols, profondeur et qualité de la nappe, ...)

91

Comprendre l'organisation spatiale de la salinité des sols

- Caractériser la variabilité des sols et de la salinité aux différentes échelles considérées : totalité ou partie de l'aménagement, secteurs de référence, selon une analyse préalable des facteurs de risque ou de l'existence de manifestations de la salinité
- Recours éventuel à la télédétection aux petites échelles
- Réaliser un maillage systématique : Utilisation conjointe possible de techniques simples et rapides (électromagnétiques ou autres) et de prélèvements pour en accroître la justesse. Maillage à optimiser en fonction d'une détermination préalable de la structure spatiale.
- Pas de fréquence régulière requise.
- Définir « typologie » et hypothèses pour la sélection de zones test ou parcelles représentatives

92

Mise en œuvre de dispositifs de suivi de l'évolution des sols

- Privilégier le suivi d'indicateurs à l'échelle de la parcelle
- Optimiser le plan d'échantillonnage de façon à minimiser la variance intra-parcellaire : au moins 5 échantillons composites distribués aléatoirement. Structure de l'échantillon composite à préciser en fonction de l'hétérogénéité supposée, et liée à la méthode d'irrigation
- Investir prioritairement dans la caractérisation du système et de son état initial (salinité, sodicité, ... mais aussi texture, topographie, ...).
- Adapter le dispositif et la fréquence de mesure aux capacités ; Veiller à la représentativité et stabilité des périodes de mesure.
- Évaluer conjointement les pratiques et performances sur les plans hydrauliques et agronomiques + Quantifier les bilans en eau et en sels aux différentes échelles pertinentes et accessibles

93

Cas particulier de la nappe

- Si la nappe est proche de la surface, établir (et optimiser) un réseau de piézomètres pour la caractérisation de la structure spatiale et le suivi de la profondeur et de la salinité
- Si pompage dans la nappe, suivi de la qualité des eaux utilisées sur chaque parcelle du dispositif
- Mesure privilégiée de la conductivité électrique pour un suivi régulier (voire continue), complété périodiquement par l'analyse d'échantillons

94

B. Méthode d'approche pour la Gestion et le contrôle de la salinité

5. En guise de conclusion

95

Conclusion

Une gestion durable de l'irrigation avec des eaux (modérément salées) est techniquement possible avec :

- Conception et gestion appropriées des systèmes d'irrigation
- Technicité pour l'exploitation des eaux salées et la mise en œuvre de systèmes de culture adaptés

Mais :

- Absence de procédures de gestion, y compris l'exploitations des informations (lorsqu'elles sont disponibles)
- Prise en compte déficiente de la complexité liée aux interrelations entre aspects techniques, agronomiques, économiques, et la gestion aux différentes échelles
- **Besoins de connaissances ou nouveau regard^porté sur la gestion des eaux et le contrôle de la salinité ?**

96

Conclusion

- Nécessité d'une attention accrue portée aux agriculteurs et leurs pratiques.
- Mise en place de dispositifs pérennes de suivi des sols et d'évaluation des performances hydrauliques et agronomiques orientés vers le développement d'outils et méthodes de gestion, dont le conseil et la formation
- Des démarches nouvelles où les investissements consentis en terme d'analyse et de compréhension accompagnent un processus participatif d'innovation et d'évolution des systèmes d'irrigation
- Des approches interdisciplinaires pour le diagnostic et la raisonnement des innovations et évolutions